

MICORRIZACIÓN DE RAÍCES Y RENDIMIENTO DE GRANO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN YUCATÁN, MÉXICO

ROOT MYCORRHIZATION AND GRAIN YIELD OF MAIZE (*Zea mays* L.) IN YUCATAN, MEXICO

¹María Alma Rangel-Fajardo , ¹Jorge Ismael Tucuch-Haas , ²Lucero Guadalupe González-Tzacun ,
¹Jhonny Abraham Burgos-Díaz , ³Noel Orlando Gómez-Montiel 

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Mococho: Centro de Investigación Regional Sureste. Carr. Mérida – Motul km. 25 C.P 97450, Mococho, Yucatán, México. ²Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Península de Yucatán. Carr. Mérida – Progreso Comisaria Temozón Norte. C.P 97300, Mérida, Yucatán, México. ³INIFAP, Campo Experimental Iguala: Centro Regional de Investigación Regional Pacífico Sur. Carr. Iguala – Tuxpan km 2.5 Col. Centro. C.P 40000, Iguala de la Independencia, Guerrero, México [§]Autor de correspondencia: (rangel.alma@inifap.gob.mx).

RESUMEN

La producción de maíz en las condiciones de Yucatán se ve limitada por varios factores, bióticos, abióticos, socioeconómicos y culturales, todos confluyen en producciones de bajos rendimientos. Una práctica que se ha adoptado fuertemente es el uso de fertilizantes minerales, lo que se produce en limitantes económicas para adquirirlos y la eficiencia de estos en el rendimiento del cultivo. El objetivo del presente trabajo fue buscar alternativas que mejoren los rendimientos de maíz con base a la fertilización biológica y mineral. Se emplearon 10 genotipos de maíz bajo tres formas de fertilización (micorrizas, minerales y combinación de ambas) en un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones. Se identificó y cuantificó la presencia de estructuras de micorrizas en las raíces durante la madurez fisiológica del cultivo y se estimó el rendimiento del grano. No se encontraron diferencias en rendimiento entre los tipos de fertilización, pero sí entre genotipos sobresaliendo 39X, H-568, 25 X y 32 X, mientras que las estructuras más abundantes fueron las vesículas y los arbusculos. Se registró diferencias entre el tipo de fertilización y la cantidad de estructuras presentes, donde destacó el tratamiento de micorrizas. El uso de fertilizantes a base de micorrizas contribuyó a mantener el rendimiento.

Palabras clave: arbusculos, fertilización biológica, fertilización mineral, hifa, vesícula.

ABSTRACT

Corn production in Yucatan conditions is limited by several factors, biotic, abiotic, socioeconomic and cultural, all of them converge in low yield productions. One practice that has been strongly adopted is the use of mineral fertilizers, which results in economic limitations to acquire them and their efficiency in crop yield. The objective of the present work was to look for alternatives to improve corn yields based on biological and mineral fertilization. Ten maize genotypes were used under three forms of fertilization (mycorrhizal, mineral and combination of both) in a split-plot design with three replications. The presence of mycorrhizal structures in the roots during physiological maturity of the crop was identified and quantified, and grain yield was estimated. No differences in yield were found among fertilization types, but differences were found among genotypes, with 39X, H-568, 25 X and 32 X standing out, while the most abundant structures were vesicles and arbuscules. Differences were recorded between the type of fertilization and the amount of structures present, where the mycorrhizal treatment stood out. The use of

mycorrhizal fertilizers contributed to the maintenance of yield.

Index words: arbuscules, biological fertilization, mineral fertilization, hyphae, vesicle.

INTRODUCCIÓN

El maíz es básico en la dieta de los mexicanos y es el principal cultivo en el país. Existen gran cantidad de genotipos mejorados que ofrecen alguna ventaja como rendimiento o resistencia a factores bióticos o abióticos y la respuesta de estos se ve afectada por el manejo y las condiciones del cultivo. En Yucatán, el maíz se cultiva bajo la producción de milpa, especialmente por productores de autosuficiencia. El cultivo se desarrolla en la diversidad de suelos (Borges-Gómez, Escamilla-Bencomo, Soria-Fregoso, 2005), pero son someros y varios autores reportan baja productividad en los sistemas de producción del sistema milpa, debido a un cambio gradual en el manejo de las rotaciones y descansos de las áreas agrícolas, ocasionando que los rendimientos estatales rondan casi a una tonelada por hectárea (Castillo et al., 2020; Uribe & Dzib, 2006). La fertilidad de éstos es baja, particularmente la presencia del fósforo, que, aunque se reportan cantidades altas, en su mayoría no está disponible para el cultivo (Borges-Gómez et al., 2014). Una actividad que se ha tornado primordial para asegurar los rendimientos es la fertilización, sin embargo, más del 80 % de productores realizan esta actividad dependiendo de sus posibilidades económicas (Grageda-Cabrera et al., 2012). En los últimos meses, debido a los acontecimientos internacionales, se han visto afectados tanto la disponibilidad como el costo de los fertilizantes minerales que son empleados en la producción de maíz. Para 2019, el Servicio de Información Agrícola y Pecuaria (SIAP) reportó que sólo el 10 % de la superficie sembrada en Yucatán se fertiliza, lo que, junto con las de lluvias erráticas, resulta en bajos rendimientos de los cultivos.

Existen alternativas que son económicas y con un manejo adecuado pueden presentar resultados

de rendimiento similares al uso de fertilizantes minerales (Mora & Leblanc, 2012), los hongos formadores de micorrizas son una opción que favorece la absorción de fósforo e/o iones de baja movilidad, lo que contribuye en una óptima nutrición del cultivo (Bucher, 2007), promoviendo el crecimiento y distribución radical, además Mathur y Jajoo (2020) reportaron una reacción favorable para resistir a los efectos de las altas temperaturas al regular el fotosistema II, regulando la toma externa de agua y contribuyendo a la regulación osmótica y composición de carbohidratos. Otros beneficios es la participación activa en el intercambio de minerales entre el suelo y la rizosfera, manteniendo la fertilidad de los suelos, ya que el hongo obliga a una mayor exploración del suelo (Thangavel & Sridevi, 2015). Las respuestas de mejora, con el uso de micorrizas en la producción bajo estrés por altas temperaturas, han sido reportadas por varios autores que incluyen parámetros como rendimiento, acumulación de masa entre otros (Zhu et al., 2011) además de que en general, el cultivo demanda menor cantidad de fertilizantes minerales; como lo reportan Serralde y Ramírez (2004) y Bi et al. (2003) que observaron que los suelos con bajas concentraciones de fósforo pueden favorecer una buena micorrización; mientras que Rakshit y Bhadoria (2010) reportan aumento en la respuesta de micorrización con la adición de fósforo; caso contrario reportaron Mora y Leblanc (2012) quienes observaron que con el aumento de fósforo la micorrización reducía en las raíces de maíz. Otro beneficio que se ha documentado es la tolerancia a enfermedades promoviendo mejores resultados en los rendimientos (Bardeni et al., 2018; Reyes et al., 2017).

Con las condiciones de suelo y agua presentes en Yucatán, es necesario contar con estrategias que puedan contribuir al aprovechamiento de los nutrientes del suelo, que permita una sinergia positiva con el cultivo y contribuya a hacer frente a los efectos del cambios climáticos, como la presencia errática de las temporadas de lluvia, en este sentido, el uso de micorrizas para la

fertilización pueden ser son una opción para satisfacer las necesidades nutrimentales de los cultivos (Cardoso y Kuyper, 2006). Por tal razón, el objetivo del presente trabajo fue cuantificar la micorrización en raíces de maíz y la respuesta de rendimiento de nueve genotipos sometidos a fertilización mineral, biológica y la combinación de ambas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El experimento se estableció en el Sitio Experimental Uxmal, Muna, Yucatán, que se localiza en la antigua carretera Mérida – Campeche ruinas km. 72, en el ciclo (primavera-verano) PV de 2021. Las características del suelo se obtuvieron del análisis realizado por la empresa FERTILAB; suelo de textura franca, 2.6 % de materia orgánica, con pH de 7.56, conductividad eléctrica (CE) de 0.44 dS m⁻¹, capacidad de intercambio catiónico de 19.1 meq/100 g, presencia de nitrógeno en forma de NO₃ de 24.3 ppm; 30.8 ppm de fósforo disponible y 746 ppm de potasio intercambiable. Las necesidades hídricas del cultivo fueron suministradas con riego por goteo. Se mantuvo libre de malezas con aplicaciones de herbicidas (nicosulfuro I L ha⁻¹) y el control de plagas con los insecticidas adecuados (spinoteram 100 mL ha⁻¹).

Diseño experimental

El trabajo consistió en el manejo de tres tipos de fertilización (fertilización mineral con la fórmula 40-100-00), aplicación de fertilizante biológico (micorrizas), en este caso se empleó el producto comercial GLUMIX ®, que consiste en una mezcla de esporas de hongos endomicorrízicos (20,000 esporas viables kg⁻¹). Se utilizó la dosis recomendada en la etiqueta de 1 kg ha⁻¹ y un tratamiento de combinación de ambas fertilizaciones.

El experimento se estableció en un arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones. Bajo

la ecuación $Y_{ijk} = \mu + A_i + \beta_j + (A\beta)_{ij} + B_k + (AB) + \varepsilon_{ijk}$. Donde: Y_{ijk} = variable dependiente, μ = media general, A_i = parcela grande (tipos de fertilización), β_j = error experimental para parcela grande, B_k = efecto de la parcela chica (genotipos), ε_{ijk} = error experimental. Los tratamientos estuvieron compuestos por tres tipos de fertilización (A_i) distribuidos en las parcelas grandes y 10 genotipos (B_k) de maíz blanco (25X; H-568; VS-558; Sin Blan; H-565; 32X; Sin Ad; 39X; Sin Oco y 6X), todos generados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), los genotipos fueron distribuidos en las parcelas chicas que consistían en cuatro surcos de 10 m de largo y 80 cm entre surco.

Micorrización de raíces

Para identificar la colonización de las micorrizas por tipo de fertilización y material evaluado, durante la etapa de llenado de grano (entre R5 y R6), se tomaron tres repeticiones de medio kilogramo de tierra de las plantas dispuestas en los surcos centrales de cada parcela chica dentro de cada parcela grande. Las muestras fueron colocadas en bolsas de plástico hasta procesarlas. Con ayuda de tres cribas marca The W.S. Tyler company (19, 12.5 y 9.5 mm) el suelo de cada muestra fue lavado con agua corriente, se recuperaron todas las raíces presentes con grosor de 1 a 3 mm y se colocaron en tubos con alcohol al 50 % v/v y fueron almacenadas a 4 °C hasta procesarlas.

Para determinar la infección de micorriza en las raíces, éstas fueron procesadas de acuerdo a la metodología propuesta por Phillips y Hayman (1970). Las raíces fueron lavadas con agua corriente hasta eliminar los restos del fijador y tierra que pudiera contener, posteriormente se colocaron en tubos de 5 mL y se cubrieron con KOH al 10 % p/v y llevadas a baño María por 45 min, finalizado el tiempo se enjuagaron con agua corriente y se adicionó H₂O₂ durante 10 min, se realizó un nuevo enjuague con agua destilada. Las

raíces se sumergieron en HCl 0.01N por 5 min, pasado el tiempo se decantó y las muestras se colocaron en colorante azul de tripano al 0.05 % y se colocaron nuevamente en baño María por 60 minutos, y las raíces se colocaron en una solución de glicerol 50 % v/v hasta su observación en el microscopio. Las observaciones de las raíces fueron en un microscopio óptico de luz Motic BA 200. Se tomaron 10 fragmentos de raíz de aproximadamente 1 cm de longitud (Cuba et al., 2020), donde se contabilizaron e identificaron estructuras de hifas, arbusculos y vesículas.

Rendimiento de grano

El rendimiento se estimó hasta que el grano presentó 16 % de humedad. Las parcelas se cosecharon por separado y se registró el rendimiento, eliminado mazorcas dañadas por pudriciones o sin llenado. El registro del rendimiento fue en kilogramos para un área de 24 m² y se estimó el rendimiento a una hectárea ajustando la humedad a 14 % (Maria-Ramírez, Volke-Haller, & Guevara-Romero, 2017).

Manejo y análisis de datos

Los datos obtenidos fueron analizados para verificar la normalidad y la homogeneidad de

varianzas por medio de las pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett ($\alpha = 0.05$). Las estructuras micorrícicas contabilizadas por centímetro y el rendimiento estimado se analizaron mediante un ANOVA, además de realizar una comparación de medias (Tukey, 0.05) con ayuda del programa estadístico R versión 4.0.5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presencia de estructuras de micorrizas no arrojó diferencias entre genotipos para hifas y vesículas, sin embargo, los arbusculos si presentaron diferencias ($p \leq 0.05$), donde el material 39 X tiene en promedio 9.07 estructuras por centímetro, mientras que en VS-558 solamente se observaron en promedio 3.27 estructuras cm⁻¹. Al revisar la presencia de estructuras dependiendo del tipo de fertilización, se observaron diferencias, para la presencia de vesículas ($p \leq 0.01$) y arbusculos ($p \leq 0.05$), en el caso de las vesículas, se contabilizaron 42.46 % más estructuras en el tratamiento de fertilización donde sólo se aplicó con micorrizas, que en aquel donde se usó fertilización química y 30.87 % más que en el tratamiento de combinación (Tabla I).

Tabla I. Promedio de estructuras observadas en raíces de maíz y rendimiento estimado.

Genotipo	Estructuras de micorrizas observadas (promedio cm ⁻¹)			Rendimiento (t ha ⁻¹)
	Hifas	Vesículas	Arbusculos	
39x	7.07±0.9 ^a	17.17±3.5 ^a	9.07±1.2 ^a	4.17±1.10 ^a
6x	6.20±0.6 ^a	21.47±3.5 ^a	5.83±0.8 ^{abc}	3.61±0.62 ^{ab}
H-568	5.93±0.6 ^a	19.23±3.4 ^a	8.37±1.3 ^{ab}	4.31±1.44 ^a
Sin Oco	6.90±0.5 ^a	18.53±3.7 ^a	7.90±1.0 ^{abc}	3.19 ±1.08 ^{ab}
H-565	4.63±0.6 ^a	12.10±3.2 ^a	5.13±0.9 ^{abc}	3.33±1.08 ^{ab}
Sin Blan	4.83±0.5 ^a	17.33±3.1 ^a	4.50±0.7 ^{abc}	2.78±1.61 ^{ab}
25X	5.50±0.8 ^a	11.17±1.9 ^a	4.00±0.8 ^{bc}	4.31±0.63 ^a
32X	5.47±0.5 ^a	13.93±3.1 ^a	5.50±0.8 ^{abc}	4.31±1.34 ^a
VS-558	4.90±0.6 ^a	17.37±3.8 ^a	3.27±0.7 ^c	2.31±0.81 ^b
Sin Ad	4.53±0.6 ^a	14.00±2.8 ^a	8.63±1.8 ^{ab}	2.08 ±1.26 ^b
CV (%)	6.8	14.9	29.0	3.4
	Tipo de fertilización			
Micorrizas	6.03±0.45 ^a	21.48±1.8 ^a	8.43±0.7 ^a	3.61±1.20 ^a
Fertilizante químico	5.21±0.33 ^a	12.36±1.3 ^b	4.91±0.4 ^b	3.79±1.54 ^a
Combinación	5.55±0.35 ^a	14.85±1.9 ^b	5.23±0.6 ^b	3.17±1.30 ^a
CV (%)	28.0	18.9	19.0	3.9

Medias con distinta letra en la columna y por parcela son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Se incluye media \pm desviación estándar.

Tabla 2. Grados de libertad, cuadrado medio y significancia resultado del análisis de varianza (ANOVA) de las variables respuesta de genotipos de maíz.

Fuente de variación	Variables respuesta							
	Hifas		Vesículas		Arbúsculos		Rendimiento	
	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM
Fertilización	2	16.97 ^{ns}	2	2222.2 ^{**}	9	132.7 ^{**}	2	3.069 ^{ns}
Genotipo	9	24.97 ^{ns}	9	326.9 ^{ns}	2	307.5 ^{**}	9	6.422 ^{**}
Fertilización×Genotipo	18	44.86 ^{**}	18	506.4 [*]	18	131.9 ^{**}	18	0.947 ^{ns}
Residuales	270	12.42	270	299.2	270	26.3	60	1.397

GL: grados de libertad; CM: cuadrados medios; significancia; * : $p \leq 0.05$; ** : $p \leq 0.01$; ns: no significativo ($p > 0.05$).

La interacción del tipo de fertilizante con el material arrojó diferencias en la cantidad de estructuras presentes en las raíces (**Tabla 2**). La presencia de hifas pudo observarse con mayor frecuencia en el material 39 X cuando la fertilización fue con micorrizas, disminuyendo de manera considerable cuando la fertilización fue química (8.8 hifas cm^{-1} promedio) o combinada (3.6 hifas cm^{-1} en promedio). Para los genotipos 6 X, Sin Oco, H-565 se presentó un ligero aumento en el número de hifas en la fertilización química, superando la fertilización con micorrizas (**Figura 1a**); en el caso de la fertilización combinada los genotipos 6X y H-565 registraron reducciones considerables en el número de hifas observadas, con respecto al de mayor registro para ese tipo de fertilización (39 X), las diferencias fueron de 5.8 y 3.7 respectivamente para cada material.

El número de vesículas no arrojó diferencias, sin embargo, en algunos genotipos fue posible observar un mayor número de vesículas cuando la fertilización fue sólo con micorrizas, tal es el caso de 39 X, H-568, H-565, Sin Blan, 25 X, 32 X, VS- 558 y Sin Ad; mientras 6X y Sin Oco mostraron un mayor número de vesículas con la fertilización química, por otro lado, en la combinación de fertilizaciones solamente los genotipos Sin Oco y 32 X superaron a los otros dos tratamientos (**Figura 1b**).

La cantidad de arbúsculos observados en las raíces de los genotipos evaluados presentaron

diferencias ($p \leq 0.01$), la fertilización con micorrizas favoreció la presencia de estas estructuras principalmente en los genotipos H-568 y 39 X superando a 6 X con 10.9 estructuras observadas por centímetro, cabe mencionar que este material junto con 32 X fueron los únicos que registraron valores superiores en la fertilización química en contraste con los otros dos tratamientos (**Figura 1c**). En cuanto al tratamiento de combinación de fertilización solamente Sin Ad destacó sobre todos los genotipos y tratamientos de fertilización con una diferencia de 13.3 estructuras con respecto al material que registró menor número de arbúsculos y una diferencia de 12.1 entre los tratamientos de fertilización, siendo la fertilización química la de menor número de estructuras observadas.

Aunque varios autores concuerdan en que no existe especificidad de las micorrizas en los cultivos, es decir, todas las micorrizas pueden establecer un proceso de infección en las raíces de las plantas, siempre y cuando se encuentren las condiciones ambientales para que se establezcan (Carrillo-Saucedo et al., 2022; Giovannini et al., 2022; ; Zulueta-Rodríguez et al., 2020; Grageda-Cabrera et al., 2012). Wright et al. (2005) observaron que la respuesta de infección fue diferente en genotipos de maíces europeos contra genotipos africanos, lo que indica la existencia de diferencias entre la cantidad de infección entre genotipos, de igual forma Chu et al. (2013) observaron un comportamiento diferente entre

genotipos mejorados, lo cual se pudo observar en el presente estudio donde los genotipos con mayor rendimiento (39X, H-568, 25 X y 32 X) también

registraron la mayor cantidad de estructuras micorrizicas.

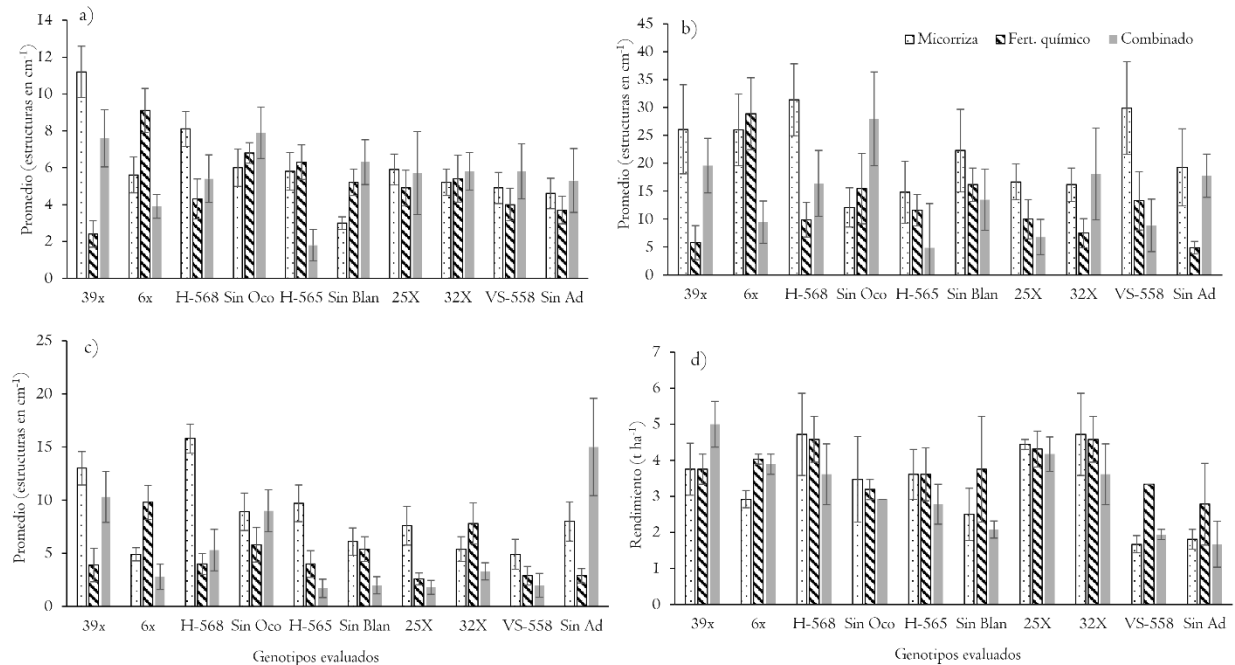


Figura I. Respuesta de la interacción nueve genotipos de maíz con tres tipos de fertilizante. a) promedio de hifas; b) promedio de vesículas; c) promedio de arbusculos; d) rendimiento.

El nivel de infección estará determinado por varios factores, como la humedad del suelo, las concentraciones de fósforo disponible, la habilidad genética y fisiológica de la planta y el hongo en entablar la asociación (Carrillo-Saucedo et al., 2022; Giovannini et al., 2022; Grageda-Cabrera et al., 2012). En la mayoría de los trabajos revisados se encontró que la mayor cantidad de estructuras de micorriza se localizan en los tratamientos donde solamente fueron empleadas inoculaciones (Uribe y Dzib, 2006; Pérez-Luna et al., 2012; Mora y Leblanc, 2012), tal como en observa donde en el tratamiento donde sólo se usó micorriza, el cual superó al tratamiento de combinación y a la fertilización química, situación similar reporta Mora y Leblanc, (2012) quienes observaron una mejor respuesta en acumulación de materia seca en plantas de maíz inoculadas con *Glomus*

fasciculatum que el tratamiento con fertilizante químico; en este sentido Fasusi, Amoo y Babalola (2021) observaron diferencias en el porcentaje de colonización de raíces, dependiendo de la micorriza, resaltando la eficiencia de *Rhizophagus irregularis* y aunque en este trabajo se empleó un producto comercial se pudo observar un alto porcentaje de infección en las raíces de plantas que fueron tratadas sólo con micorrizas, reportando diferencias ($p \leq 0.05$) o promedios mayores en los registro de vesículas, arbusculos e hifas.

De acuerdo con Pérez-Luna et al. (2019) y Moreira et al. (2006) la presencia de las estructuras será diferente, dependiendo de la etapa del cultivo y las condiciones climáticas presentes. El tipo de estructura está relacionado con las características físicas y químicas del suelo y las temperaturas

(Diehl y Fontenla, 2010; Lee et al., 2009). En los resultados se registraron más vesículas y arbusculos que hifas esto puede deberse al estado fisiológico en el que se encontraba el cultivo evaluado, el cual estaba a punto de concluir y la demanda de nutrientes por parte de la planta había disminuido (Aguilera-Gómez et al., 2007).

Por otro lado, el rendimiento de los genotipos evaluados registró diferencias ($p \leq 0.01$) de 2.23 t ha⁻¹ entre los de mayor rendimiento (39X, H-568, 25 X y 32 X) y los de menor registro (VS-558 y Sin Ad), estos rendimientos pueden responder a las características genéticas de los genotipos, el híbrido H-568 está adaptado para condiciones tropicales y en condiciones óptimas de manejo puede rendir alrededor de 5 t ha⁻¹ (Gómez Montiel et al., 2017) los genotipos 39X, 25 X y 32 X aún son experimentales, mientras que el material de menor rendimiento fue una variedad sintética, en algunos estudios indican que los híbridos tienden a superar en rendimiento a las variedades y unido a esta condición genética. Ya que los rendimientos obtenidos por tipo de fertilización no presentaron diferencias (**Tabla 2**), a pesar de esto la fertilización química superó ligeramente a la fertilización con micorriza y a la combinación (**Tabla 1**).

Al analizar la combinación de los genotipos con cada una de las condiciones de fertilización se observa una respuesta diferente en cada uno. A pesar de no reportar diferencias en la respuesta de rendimiento con el tipo de fertilización, se puede observar que los genotipos evaluados respondieron diferente dependiendo al tipo de fertilización (**Figura 1d**), el material 39 X fue el único que superó a todos cuando la aplicación de fertilizante fue combinada, mientras en el resto el rendimiento entre la fertilización química o con micorriza era similar, salvo los genotipos para Sin Blan, VS-558 y Sin Ad, en los cuales el rendimiento se redujo considerablemente sin registrar diferencias.

Los resultados de rendimiento obtenidos concuerdan con lo obtenido por Cabrales et al. (2016) así como Uribe y Dzib (2006) quienes

tampoco encontraron diferencias estadísticas en los rendimientos con los tratamientos empleados en sus trabajos, sin embargo, sí se observa un ligero incremento de rendimiento en los genotipos que fueron inoculados. En el presente trabajo, aunque no fue el caso de todos los genotipos, se puede resaltar H-568, Sin Oco, 25 X y 32X con ligeros aumentos de rendimiento que van de 140, 280, 130 y 140 kg respectivamente. Otros autores confirman un comportamiento favorable de la planta y raíces de maíz inoculada con micorriza, aun cultivada bajo condiciones de suelos infértiles (Fasusi et al., 2021; Bi et al., 2003). La respuesta de rendimiento pueden diferir entre los genotipos evaluados, como en este caso, algunos autores indican que esto dependerá del tipo de micorriza que se esté inoculando, las concentraciones de fósforo disponible y la afinidad del cultivo con el tipo de micorriza (Chu et al., 2013). En el manejo del suelo donde se lleve a cabo el cultivo, dependerá del éxito de la micorrización, tal como lo observaron Pérez-Luna et al. (2012) quienes indican que los suelos manejados con coberturas y uso de micorrizas favorece la asociación del cultivo con el hongo.

CONCLUSIONES

El mayor promedio de estructuras de micorrizas fue obtenido en raíces de plantas fertilizadas solamente con micorrizas, por lo que se dio una buena simbiosis que permitió mantener los rendimientos igual que los tratamientos donde se involucró fertilizante mineral. Aunque no se registraron diferencias en los rendimientos dependientes de la fertilización, estos rendimientos fueron similares y hubo respuesta diferente en los genotipos evaluados, por lo que se considera que el uso de micorrizas como fertilización es una opción viable para productores de escasos recursos ya que no afecta negativamente los rendimientos, además de ser una fuente accesible, económica y sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Al INIFAP por el financiamiento del proyecto SIGI: I0295635543. Mejoramiento genético y registro de variedades de maíz para el trópico bajo de México y sus nichos ecológicos.

Se agradece el apoyo de los señores Diodoro Morales Couoh, Víctor Gabriel Vázquez Herrera e Hilario Díaz Fuentes, por su apoyo en las actividades de campo.

REFERENCIAS

- Aguilera-Gómez, L., Portugal, V. O., Arriaga, R. y Contreras, A. R. (2007). Micorrizas arbusculares. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), 300–306.
<https://www.redalyc.org/pdf/104/10414307.pdf>
- Berdeni, D., Cotton, T. E. A., Daniell, T. J., Bidartondo, M. I., Cameron, D. D. & Evans, K. L. (2018). The effects of arbuscular mycorrhizal fungal colonisation on nutrient status, growth, productivity, and canker resistance of apple (*Malus pumila*). *Frontiers in Microbiology*, 9 (JUL).
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01461>
- Bi, Y. L., Li, X. L., Christie, P., Hu, Z. Q. & Wong, M. H. (2003). Growth and nutrient uptake of arbuscular mycorrhizal maize in different depths of soil overlying coal fly ash. *Chemosphere*, 50(6), 863–869.
[https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00231-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00231-X)
- Borges-Gómez, L., Escamilla-Bencomo, A. & Soria-Fregoso, M. (2005). Potassium in Soils of Yucatán. *Terra Latinoamericana*, 23, 437–445.
- Borges-Gómez, L., Moo-Kauil, C., Ruíz-Novelo, J., Osalde-Balam, M., González-Valencia, C., Yam-Chimal, C. & Can-Puc, F. (2014). Suelos destinados a la producción de chile habanero en Yucatán: Características físicas y químicas predominantes. *Agrociencia*, 48(4), 347–359.
- Bucher, M. (2007). Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. *New Phytologist*, 173(1), 11–26.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01935.x>
- Cabral H.E.M., Toro, M. & Lopez, D. (2016). Efecto de micorrizas nativas y fósforo en los rendimientos del maíz en Guárico, Venezuela. *Temas Agrarios*, 21(2), 21–31.
<https://doi.org/10.21897/rta.v21i2.898>
- Cardoso, I. M. and Kuyper, T. W. (2006). Mycorrhizas and tropical soil fertility. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 116(1–2), 72–84.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.011>
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S. & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botánica Mexicana*, 129.
<https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>
- Castillo, E., Marín, E. E., López-Tolentino, G., Chi, J. A. & Muñoz-Orsorio, G. A. (2020). Perspectivas del sistema milpa en Yucatán. *Bioagrociencias*, 14(2), 13–22.
DOI:10.56369/BAC.3912
- Chu, Q., Wang, X., Yang, Y., Chen, F., Zhang, F. & Feng, G. (2013). Mycorrhizal responsiveness of maize (*Zea mays* L.) genotypes as related to releasing date and available P content in soil. *Mycorrhiza*, 23(6), 497–505.
<https://doi.org/10.1007/s00572-013-0492-0>
- Cuba, M. N. A., Santillán, S. M. T., Hurtado, G. P., Ordinola, S. A. P. & Mainegra, A. B. (2020). Caracterización de la colonización por micorrizas en *Retrophyllum rospigliossi* (Pilger) en el bosque Huamantanga, Perú. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 8(3), 535–549.
- Diehl, P. and Fontenla, S. B. (2010). Arbuscular mycorrhizal infection in two morphological root types of *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch. *Revista Argentina de Microbiología*, 42(2), 133–137.
- Fasusi, O. A., Amoo, A. E. & Babalola, O. O. (2021). Propagation and characterization of viable arbuscular mycorrhizal fungal spores within maize plant (*Zea mays* L.). *Journal of*

- the Science of Food and Agriculture*, 101(14), 5834–5841.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.11235>
- Giovannini, L., Sbrana, C., Giovannetti, M., Avio, L., Lanubile, A., Marocco, A. & Turrini, A. (2022). Diverse mycorrhizal maize inbred lines differentially modulate mycelial traits and the expression of plant and fungal phosphate transporters. *Scientific Reports*, 12(1), 1–12.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-25834-7>
- Gómez M. N. O., Cantú-Almaguer, M. Á., Vázquez-Carrillo, M. G., Hernández-Galeno, C. del Á., Espinosa-Calderón, A., Sierra-Macías, M., Coutiño-Estrada, B. de J., Aragón-Cuevas, F. & Trujillo-Campos, A. (2017). Híbrido de maíz H-568: nueva opción para áreas de alta productividad del trópico bajo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1213–1218.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.121>
- Grageda-Cabrera, O., Díaz-Franco, A., Peña-Cabiales, J. J. & Vera-Núñez, A.J. (2012). Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3, 1261–1274.
- Lee, K. J., Lee, K. H., Tamolang-castillo, E. & Budi, S. W. (2009). Biodiversity_ spore density and root colonization of Arbuscular Mycorrhizal fungi at Expressway Cut-slopes in Korea. *Journal of Korean Fores Sciety*, 98(5), 539–547.
- Maria-Ramírez, A., Volke-Haller, V. H. & Guevara-Romero, M. L. (2017). Yield estimation of native corn varieties in the State of Tlaxcala. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 13(1), 8–14.
- Mathur, S. and Jajoo, A. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi protects maize plants from high temperature stress by regulating photosystem II heterogeneity. *Industrial Crops and Products*, 143, 111934.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111934>
- Mora, A. N. y Leblanc, H. (2012). Evaluación del uso de micorrizas arbusculares para disminuir la aplicación de fertilizantes fosforados en el cultivo del maíz. *Tierra Tropical*, 8(2), 245–255.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1345.2002>
- Moreira, M., Baretta, D., Siu, M. T. and Cardoso, E. J. B. N. (2006). Spore density and root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi in preserved or disturbed *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. ecosystems. *Scientia Agricola*, 63(4), 380–385.
<https://doi.org/10.1590/s0103-90162006000400009>
- Pérez-Luna, Y. del C., Álvarez-Gutiérrez, P. E., González Mendoza, D. y Mendez-Trujillo, V. (2019). Evaluación de la presencia de hongos micorrízico arbusculares en un bosque de pino-encino en Chiapas, México. *IDESIA*, 37(1), 67–73. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292019005000401>
- Pérez-Luna, Y. del C., Álvarez-Solís, J. D., Mendoza-Vega, J., Pat-Fernández, J. M., Gómez-Álvarez, R. & Cuevas, L. (2012). Diversidad de hongos micorrícicos arbusculares en maíz con cultivo de cobertura y biofertilizantes en Chiapas, México. *Gayana Botanica*, 69(1), 46–56.
<https://doi.org/10.4067/S0717-66432012000100006>
- Phillips, J. M. and Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158–168.
[https://doi.org/10.1016/s0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/s0007-1536(70)80110-3)
- Rakshit, A. and Bhadoria, P. (2010). Role of VAM on growth and phosphorus nutrition of maize with low soluble phosphate fertilization. *Acta Agronómica*, 59(1), 119–123.
- Reyes T.A., Quiñones-Aguilar, E. E., Rincón-Enríquez, G. y López-Pérez, L. (2017). Micorrización en *Capsicum annum* L. para promoción de crecimiento y bioprotección contra *Phytophthora capsici* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(4), 857.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v7i4.260>

- Serralde, A. M. y Ramírez, M. M. (2004). Análisis de poblaciones de micorrizas en maíz (*Zea mays*) cultivado en suelos ácidos bajo diferentes tratamientos agronómicos. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 5(1), 31–40. https://doi.org/10.21930/rcta.vol5_num1_art:22
- Thangavel, P. and Sridevi, G. (2015). Environmental sustainability: Role of green technologies. In *Environmental Sustainability: Role of Green Technologies*. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2056-5>
- Uribe, G. y Dzib, R. (2006). Micorriza arbuscular (*Glomus intraradices*), *Azospirillum brasilense* y Brassinoesteroide en la producción de maíz en suelo luvisol. *Agricultura Técnica en México* 32(1), 67–76).
- Wright, D. P., Scholes, J. D., Read, D. J. & Rolfe, S. A. (2005). European and African maize cultivars differ in their physiological and molecular responses to mycorrhizal infection. *New Phytologist*, 167(3), 881–896. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01472.x>
- Zhu, X. C., Song, F.B., Liu, S.Q., & Liu, T.D. (2011). Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on photosynthesis and water status of maize under high temperature stress. *Plant and Soil*, 346(1), 189–199. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0809-8>
- Zulueta-Rodríguez, R., Gómez-Merino, F. C., Alemán-Chávez, I., del Carmen Núñez-Camargo, M. & Lara-Capistrán, L. (2020). Maize yield response to bio-inoculation and chemical fertilization reduction under field conditions. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 597–612. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.656>